

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Bakalářská práce

Rok: 2010

Jiří Kada

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

Návrh obvodu pro simulaci termočlánků
řízenou PC
Thermocouple simulation circuit design
controlled by PC

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Kada**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2601R004 Měřicí a řídicí technika
Téma: **Návrh obvodu pro simulaci termočlánků řízenou PC**
Thermocouple Simulation Circuit Design Controled by PC

Zásady pro vypracování:

1. Problematika simulace termočlánků.
2. Návrh elektronického zapojení pro jednoduchý simulátor termočlánků.
3. Vytvoření konfigurační aplikace na platformě PC.
4. Provedení testů a porovnání výsledků simulátoru s dostupnými řešeními.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. KREIDL, M. Měření teploty - senzory a měřicí obvody. BEN - technická literatura, Praha 2005. ISBN 80-7300-145-4
2. KERLIN, Thomas W. Practical Thermocouple Thermometry. ISA 1999. ISBN-10: 1556176449
3. české a evropské normy s problematikou termočlánků

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Slanina, Ph.D.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 7. května 2010

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu panu Ing. Zdeňku Slaninovi, Ph.D. a panu Ing Davidu Valovi za jejich pomoc a cenné rady při realizaci této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem zařízení pro simulaci termočlánků. Konkrétně návrhem simulátoru termočlánku typu J, který se bude řídit pomocí aplikace vytvořené na platformě PC. Základní částí hardwarového řešení je mikroprocesor, který komunikuje s počítačem pomocí USB rozhraní. Na základě přijatých dat mikroprocesor nastaví pomocí D/A převodníku a jím řízeného bipolárního zdroje proudu požadovanou hodnotu termoelektrického napětí na měřicím rezistoru. Dále mikroprocesor prostřednictvím záporné napěťové zpětné vazby reguluje hodnotu na hodnotu vyžadovanou uživatelem.

Abstract

This bachelor work deal with development of device for simulation of thermocouples. Concretely with design of simulation of J type thermocouple, which is controlled by application created for PC platform. The main part of hardware is microprocessor, that comunicates with computer by USB interface. On the basis of received data microprocessor with the assistance of bipolar current source controlled by D/A convertor sets desired value of thermoelectric voltage on measuring resistor. Furthermore microprocessor by force negative voltage feedback regulates the value desired by user.

Klíčová slova

Termoelektrický článek, simulátor, D/A převodník, A/D převodník, řízený zdroj proudu, mikroprocesor, USB

Keywords

Thermocouple, Simulator, D/A convertor, A/D convertor, controlled current source, microprocessor, USB

Seznam použitých symbolů a zkratek

C# - programovací jazyk
C – programovací jazyk
USB – univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
A/D – analogově/digitální převodník
D/A – digitálně/analogový převodník
Baud – jednotka rychlosti přenosu
Termočlánek – termoelektrický článek
DPS – deska plošného spoje
GND, AGND, GNDIO - země
COM – sériový port počítače
EMC – elektromagnetická kompatibilita
PC – osobní počítač (Personal Computer)
U – napětí
I – proud
R – odpor
MISO – vstup master výstup (slave Master In Slave Out)
MOSI – výstup master vstup slave (Master Out Slave In)
SCK – hodinový signál
SPI – sériové rozhraní (Serial Peripheral Interface)
CS – výběr součástky (Chip Select)
Q – teplo
J – joul
t – teplota
v – teplota
°C – stupeň Celsia
K – stupeň Kelvina
F – stupeň Fahrenheita
NTC – negativní polovodičový termistor
PTC – pozitivní polovodičový termistor
NRZI – komunikační metoda (Non Return To Zero)

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Problematika termočlánků a jejich simulace.....	7
2.1 Teplo, teplota.....	7
2.1.1 Teplo.....	7
2.1.2 Teplota.....	8
2.2 Druhy teploměrů, čidel a jejich princip.....	8
2.3 Termočlánek.....	9
2.3.1 Popis termočlánku a jeho funkce.....	9
2.3.2 Kompenzace studeného konce.....	10
2.3.3 Statické a dynamické chyby termočlánků.....	11
2.3.4 Chyby měření.....	12
2.3.5 Nejistoty měření.....	12
2.3.6 Životnost termočlánků.....	14
2.3.7 Termoelektrická pravidla.....	15
2.3.8 Typy termočlánků.....	15
2.4 Simulace termočlánků.....	15
2.4.1 Porovnání profesionálních simulátorů	16
2.4.2 Využití simulátorů	18
3. Návrh elektronického zapojení.....	19
3.1 Blokové schéma.....	19
3.2 Blok s Počítačem.....	19
3.3 Napájecí blok.....	21
3.4 Řídicí blok.....	22
3.5 Převodní blok.....	27
3.6 Výstupní blok.....	28
3.7 Blok napěťové zpětné vazby.....	28
4. Deska plošného spoje.....	29
5. Závěr.....	30
Seznam použité literatury a internetových zdrojů.....	31
Seznam příloh.....	32

1. Úvod

Téma této bakalářské práce vychází z potřeb praxe, ve které je potřeba využívat přístroj, který by dokázal simulovat chování termočlánků. To znamená, že by měl poskytovat výstupní napětí shodné s výstupním napětím zvoleného typu termočlánku při vybrané teplotě. Úkolem této práce je teoretický rozbor problematiky termočlánků a jejich praktická simulace. Ve čtyřech kapitolách jsou postupně probrány tyto oblasti: teplo, teplota, druhy teploměrů, druhy čidel a jejich základní principy, termočlánek (chyby, nejistoty měření a druhy termočlánků), simulace termočlánků. Dále jsou probrány možnosti návrhu a sestrojení přesného zdroje malého napětí, který bude možné jednoduše a elegantně řídit pomocí aplikace vytvořené na platformě PC. Tato aplikace bude vytvořena v programu Microsoft Visual Studio 2008 a zdrojový kód bude napsán v jazyce C#. Komunikace s řídicím hardwarem (mikroprocesorem) bude zajištěna pomocí USB, respektive převodníku RS232 a USB. Zdrojový kód pro mikroprocesor bude napsán v jazyce C. Součástí aplikace na PC bude také vizualizace potřebná pro jednoduché ovládání celého simulátoru a pro jednoduchou vizuální kontrolu nastavených dat.

2. Problematika termočlánků a jejich simulace

2.1 Teplo, teplota

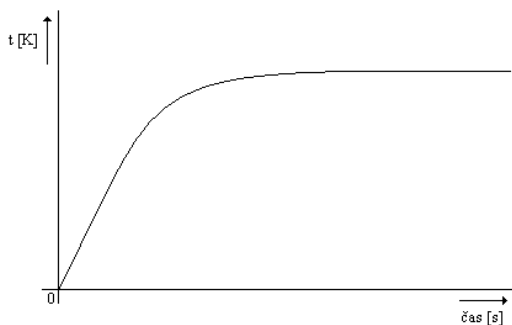
2.1.1 Teplo

Teplo je forma energie způsobená pohybem molekul. Čím rychleji se molekuly pohybují, tím je teplo větší. Ve fyzice se teplo označuje písmene Q a jeho jednotkou je Joule (J). Teplo se mezi dvěma tělesy může přenášet různými způsoby:

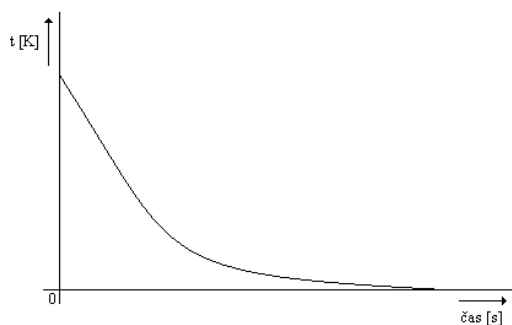
- Sáláním
- Vedením
- Zářením

Teplo se mezi dvěma tělesy předává tak dlouho, dokud se teploty obou těles nevyrovnají. Oteplování a ochlazování probíhá podle křivek oteplování a ochlazování:

[2]



Obr. 2.1 Oteplovací křivka



Obr. 2.2 Ochlazovací křivka

2.1.2 Teplota

Teplota charakterizuje tepelný stav látky. Je to základní fyzikální veličina označovaná písmenem t , T nebo symboly ϑ , Θ . Základní jednotkou teploty je K (Kelvin). Používají se i jiné jednotky jako $^{\circ}\text{C}$ (stupeň Celsia), $^{\circ}\text{F}$ (stupeň Fahrenheita). Nejnižší teplota je 0K, což odpovídá $-273,15^{\circ}\text{C}$.

[3]

2.2 Druhy teploměrů, čidel a jejich principy

Teploměry slouží k měření teploty. Existuje spousta druhů teploměrů využívajících pro svou funkci různých principů a čidel.

Měření teploty lze rozdělit na:

1. Dotykové
2. Bezdotykové

Dotykové teploměry lze dále rozdělit podle použitých čidel na:

- a) Mechanické:
 - využívající různou délkovou teplotní roztažnost (bimetalové),
 - využívající rozpínání kapalin při různých teplotách (rtuťové, lihové atd.)
- b) Elektronické:
 - Pasivní využívající změnu odporu se změnou teploty (odporové čidla):
 - kovové
 - polovodičové
 - Aktivní polovodičové čidla využívající vzniku napětí (termonapětí) při změně teploty dvou různých spojených vodičů s různou výstupní prací elektronů neboli Seebeckova jevů. Takovýmto čidlům se říká termočlánky. Termočlánků existuje celá řada různých typů.

Pasivní polovodičové odporové čidla:

- nejpoužívanější polovodičové Negastory (NTC termistory), u kterých s rostoucí teplotou jejich Odpor klesá
- méně používané polovodičové Pozistory (PTC termistory), u kterých s rostoucí teplotou jejich odpor stoupá.
- Pasivní polovodičové odporové čidla:

Pasivní kovové odporové čidla:

- Můžou být vyrobeny s různých materiálů (platina, nikl, měď). U těchto čidel s rostoucí teplotou odpor roste.

- c) Speciální:
 - Akustické
 - Krystalové
 - Magnetické
 - Optické

Bezdotykové teploměry:

- Pyrometry
- Termovize

U všech dotykových teploměrů je důležité správné umístění čidla (kvůli dobrému přechodu tepla, kdyby bylo čidlo umístěno například příliš daleko, přenos tepla by trval déle a mohlo by být ovlivněno teplotou okolí). Kde má být čidlo umístěno závisí na průmyslových podmínkách, jaké skupenství má měřená látka atd.

[1]

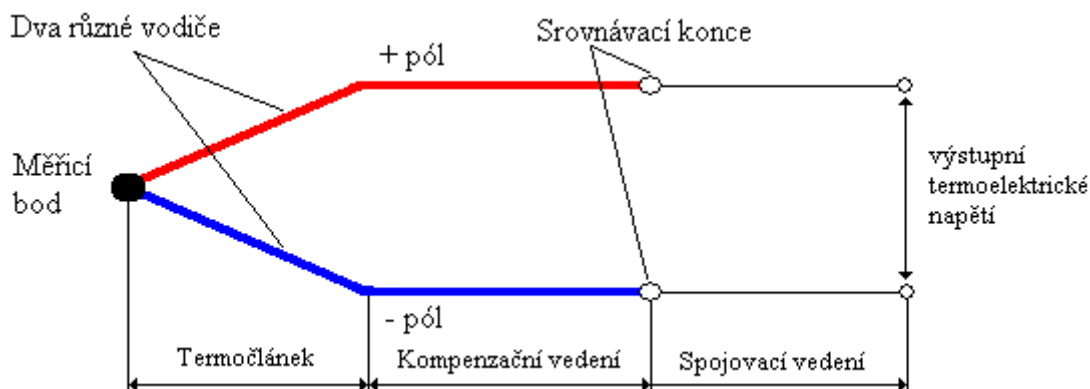
2.3 Termočlánek

2.3.1 Popis termočlánu a jeho funkce

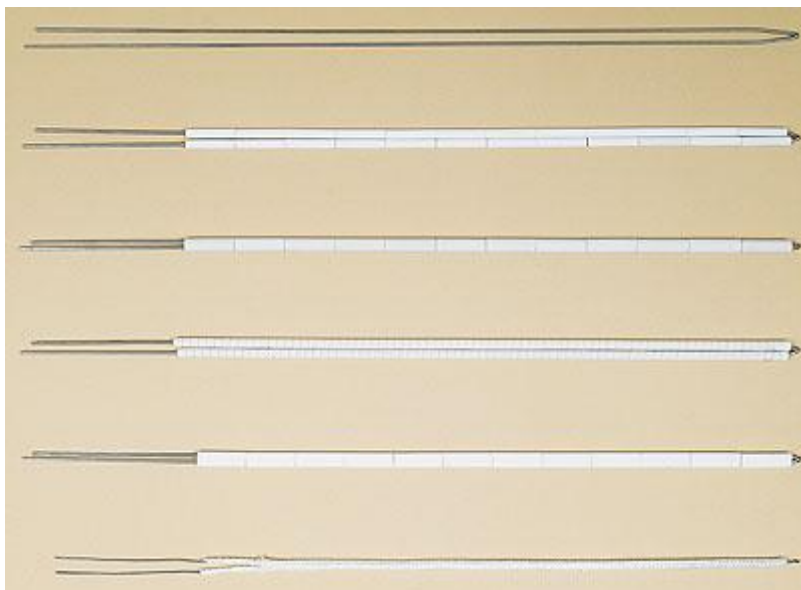
Termočlánek je čidlo sloužící pro kontaktní měření teploty. Skládá se ze dvou různých kovů na jednom konci vodivě spojených do měřicího bodu a zbylé dva konce se označují jako srovnávací konce, srovnávací místo nebo studený konec. Na srovnávacích koncích se při různých teplotách objeví termoelektrické napětí, které má určitou velikost.

Pro funkci termočlánu se využívá Seebeckův termoelektrický jev. Ten říká, že pokud mají kovy různou výstupní práci (elektrony přecházejí snadněji z jednoho kovu do druhého než opačně) tak se mezi srovnávacími konci termočlánu vytváří napětí úměrné teplotě měřicího konce. Toto napětí je závislé pouze na teplotě v místě spoje obou vodičů a na materiálu z kterého jsou vyrobeny. Materiály na výrobu termočlánu jsou například železo (Fe), platina (Pt), rhodium (Rh), nikl (Ni), chrom (Cr), měď (Cu) a jejich slitiny.

[1]



Obr. 2.3 Měřicí řetězec termočlánu



Obr. 2.4 Ukázky termočlánků firmy omega [4]

2.3.2 Kompenzace studeného konce

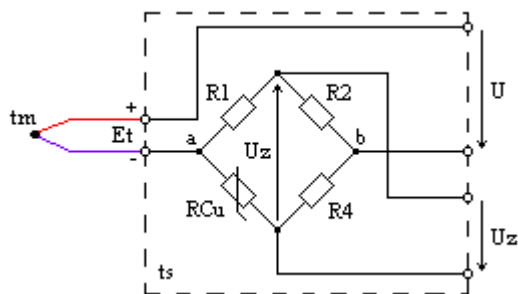
V případě kdy srovnávací konce termočlánku budou mít jinou teplotu než vztažnou (např. udanou normou), dochází k chybě měření. Tato chyba je systematická.

Způsoby kompenzace:

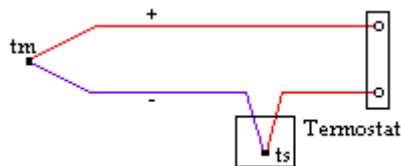
- Umístěním spojů termoelektrických článků do termostatu viz **Obr. 2.6**.
- Použitím kompenzačních zapojení
- Číslicovou korekcí (např. úprava v mikroprocesoru nebo počítači)

ad b) Kompenzace kompenzační krabicí:

Nejstarším zapojením je kompenzační krabice viz **Obr. 2.5**. Využívá se zde můstková kompenzace, která spočívá v použití Wheatstoneova můstku skládajícího se ze tří teplotně nezávislých odporů a jednoho teplotně závislého odporu. Tento můstek má samostatný napájecí zdroj U_z . Při dodržení vztažných podmínek (vztažné teploty srovnávacích konců) se na měřicích koncích Wheatstoneova můstku neobjeví žádné napětí. V případě jiné teploty srovnávacích konců než je vztažná, se vlivem teploty změní velikost teplotně závislého odporu a tím se na měřicích koncích můstku objeví napětí úměrné rozdílu teplot.



Obr. 2.5 Zapojení kompenzační krabice



Obr. 2.6 Umístěním spojů termoelektrických článků do termostatu

Kompensace může být buď pasivní (vložení teplotně závislého členu mezi termočlánek a měřidlo např. využití teplotní závislosti PN přechodu) nebo aktivní (přivedení požadovaného kompenzačního napětí z pomocného zdroje). Může se také využít speciálního integrovaného obvodu pro kompenzaci studeného konce např. XTR101.

[1]

2.3.3 Statické a dynamické chyby termočlánků

Chyby termočlánků lze rozdělit na dvě skupiny:

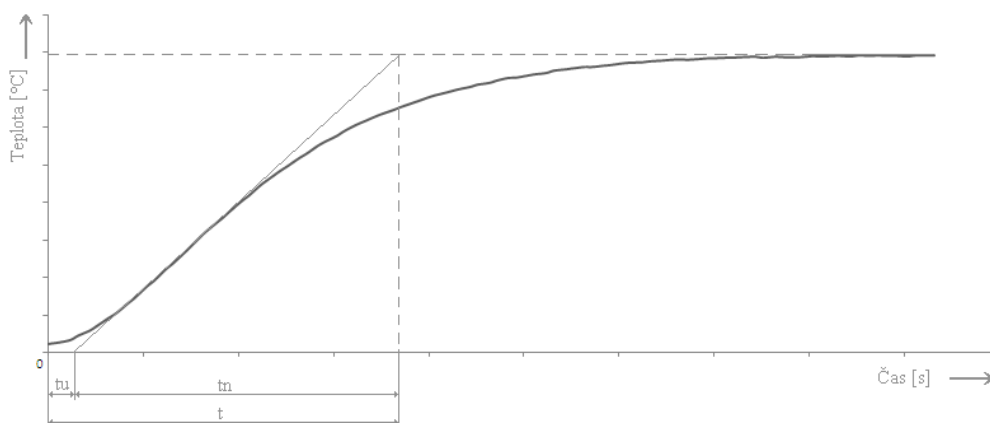
- Statické chyby
- Dynamické chyby

Statické chyby

Statickou chybu při měření termočlánkem způsobuje jednak nehomogenita použitých materiálů a jednak změna skutečné teploty srovnávacích konců od vztažné teploty.

Dynamické chyby

Dynamickou chybou se rozumí rychlost odezvy termočlánku na skokovou změnu teploty. Při zjišťování dynamických vlastností se buďto vypočtou časové konstanty, nebo se změří oteplovací křivka holého termočlánku viz **Obr 2.1** nebo charakteristika statické soustavy vyššího řádu viz **Obr 2.7** a s ní se zjišťují příslušné časové konstanty. U obrázku 1 se určí pouze jedna časová konstanta a u obrázku 2 se určují t_u – doba průtahu, t_n – doba náběhu a t – celková doba přechodového děje.



Obr. 2.7 Oteplovací křivka

Z naměřených grafů a ze zjištěných časových konstant vyplývá, že pro správné změření teploty je potřeba počkat dostatečně dlouhou dobu než se vyrovná teplota měřeného objektu s teplotou termočlánku.

Dynamicke vlastnosti jsou určeny umístěním termočlánku (to ovlivňuje přestup tepla z měřeného objektu na termočlánek, ochlazování termočlánku sáláním a vedením tepla), dále pak jestli je termočlánek umístěn v nějaké ochranné jímce (kovové, skleněné, keramické) podle typu procesu a velikosti teploty a podobně.

[1]

2.3.4 Chyby měření

Chyby měření vyjadřují přesnost měření. Tyto chyby lze rozdělit do tří skupin:

- Soustavné chyby (systematické) – jsou způsobeny chybami měřících metod, nepřesnostmi měřících přístrojů. Tyto chyby lze alespoň částečně odstranit.
- Náhodné chyby – jsou to chyby, které v čase mění svou hodnotu i znaménko.
- Hrubé chyby – jsou to chyby způsobené špatným výběrem měřící metody, chyby způsobené člověkem, vadným měřícím přístrojem.

Dále lze chyby měření rozdělit na:

- Absolutní chyba měření (ΔX) má stejný rozměr jako měřená veličina a je definována jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou (X_M) a správnou hodnotou měřené veličiny (X_S):

$$\Delta X = X_M - X_S \quad \text{[1]}$$

- Relativní chyba měření (δ) je bezrozměrná (obvykle se uvádí v %) a je definována jako podíl mezi absolutní chybou (ΔX) a naměřené hodnoty (X_M):

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_M} \quad \text{[2]} \quad \delta = \frac{\Delta X}{X_M} \cdot 100 \quad \text{[3]} \quad \text{[2]}$$

[1]

2.3.5 Nejistoty měření

Původně byly používány pouze v metrologii, později se však rozšířily a dnes již nahrazují vyjadřování nepřesností měření pomocí chyb měření. Nejistota měření se přidává k výsledku měření jako parametr určující určitý interval hodnot, ve kterém se s určitou pravděpodobností nachází správná hodnota. Standardní nejistota (u) je dána směrodatnou odchylkou měřené veličiny. Při vyjadřování přesnosti měření nejistotou je třeba nejprve odstranit všechny odstranitelné chyby (soustavné chyby).

Nejistoty měření lze rozdělit podle způsobu jejich určení na:

- Standardní nejistota typu A, označovaná jako u_A .
- Standardní nejistota typu B, označovaná jako u_B .
- Kombinovaná standardní nejistota, označovaná jako u_C .
- Rozšířená nejistota, označovaná jako $U(x)$.

Standardní nejistota typu A

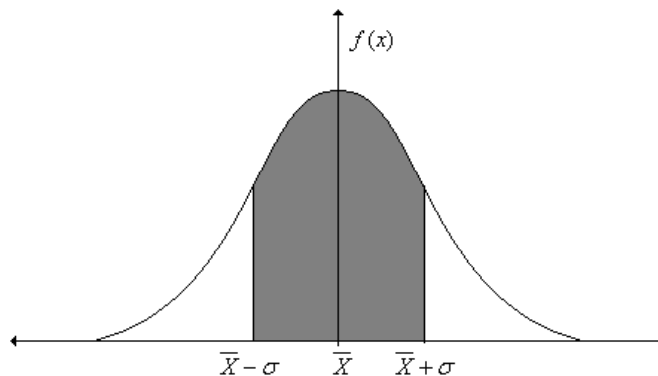
Příčiny těchto nejistot se považují za neznámé a jejich hodnota klesá se zvyšujícím se počtem měření. Její určení se provádí statistickým zpracováním naměřených hodnot. To znamená, že se za stejných podmínek provede alespoň deset měření, poté se provede výpočet výběrového aritmetického průměru:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \text{ kde } n \text{ je počet měření.} \quad (2.3)$$

Dále se určí standardní nejistota $u_A(x)$ podle vzorce:

$$u_A(x) = \sigma(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n \cdot (n-1)}}, \text{ kde } n \text{ je počet měření} \quad (2.4)$$

Rozptyl hodnot od výběrového průměru je normální neboli Gaussovo:



Obr. 2.8 Normální (Gaussovo) rozdělení

Standardní nejistota typu B

Příčiny vzniku této nejistoty mohou být chyby měřících přístrojů (stárnutí, zabudování snímačů atd.), změny okolních podmínek (teplota). Její hodnota nezávisí na počtu opakování. Zahrnuje v sobě veškeré ostatní zdroje nejistot, které nejsou obsaženy v nejistotě typu A. Její určení se provádí jinak, než statistickým zpracováním a je vyjádřena opět ve tvaru směrodatné odchylky nebo rozptylu. Pro jeden zdroj nejistoty s maximální odchylkou Δz_{\max} se určí nejistota typu B podle vzorce:

$$u_B(z) = \frac{\Delta z_{\max}}{k} \quad (2.5)$$

kde k je koeficient, podle kterého se vypočítá směrodatná odchylka.

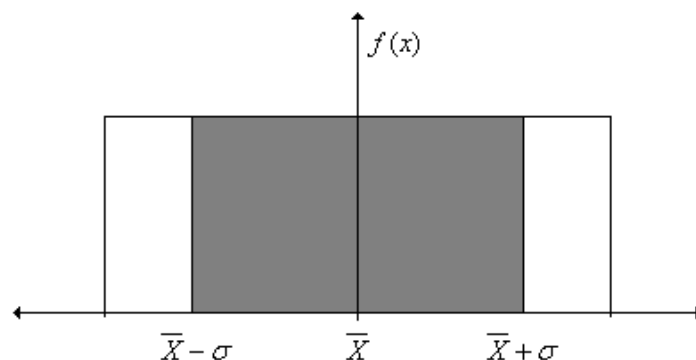
Pro normální (Gaussovo) rozdělení se volí $k=2$ nebo $k=3$, pro rovnoměrné rozdělení viz **Obr. 2.7** se volí $k = \sqrt{3}$.

V případě více zdrojů nejistot se pak tyto nejistoty sčítají podle vzorce:

$$u_B(x) = \sqrt{A_{x,zj}^2 \cdot \sum_{j=1}^m u_{Bzj}^2} \quad (2.6)$$

kde m je počet zdrojů a $A_{x,zj}$ jsou citlivostní koeficienty

$$A_{x,zj} = \frac{\partial f(z_1, \dots, z_m)}{\partial z_j}, \text{ pro } j=1, \dots, m. \quad (2.7)$$



Obr. 2.9 Rovnoměrné (symetrické) rozdělení

Kombinovaná standardní nejistota

Je to nejistota složená s nejistoty typu A, a s nejistoty typu B. Její hodnota se získá podle vzorce:

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (2.8)$$

Rozšířená nejistota:

Pravděpodobnost, že skutečná hodnota leží ve zjištěném intervalu, není příliš velká (pro normální rozložení 68%, pro rovnoměrné rozložení 58%). Pomocí této nejistoty lze zvýšit pravděpodobnost, že naměřená hodnota leží v intervalu určeném standardní nejistotou. Lze ji určit podle vztahu:

$$U(x) = k \cdot u_c(x), \text{ kde } k \text{ je koeficient rozšíření.} \quad (2.9)$$

Pro normální rozdělení se volí $k \in \langle 2,3 \rangle$. [1]

2.3.6 Životnost termočlánků

Životnost termočlánku lze ovlivnit výběrem materiálu (homogenita, odolnost) a také tím, že jej budeme používat pouze na teploty, na které je určen. Termočlánek je možné použít i na vyšší teploty (ale jen o málo vyšší), ale zkracuje se tím jeho životnost. Dále je možné zvýšit jeho životnost tím, že bude termočlánek umístěn na vhodném místě a chráněn před mechanickým poškozením (různé ochranné obaly, jímky), nebude zbytečně vystavován různým škodlivým vlivům prostředí (například působení chemických látek reagujících s materiálem termočlánků a podobně). Dále je doporučeno termočlánky kontrolovat a to alespoň jednou ročně. Kontrolou se rozumí změření parametrů termočlánku a zjištění odchylek od požadovaných hodnot. Kontroly provádí speciální akreditované laboratoře. Také je možno termočlánek zkontrolovat změřením jeho odporu, toto je ale nepřesné informativní měření.

2.3.7 Termoelektrická pravidla

Termoelektrické napětí závisí na teplotách spojů dvou vodičů a nikoliv na rozložení teploty podél vodičů. Toto platí pouze v případě, že materiál vodičů je homogenní.

Termoelektrické napětí nezávisí na vložení dalších vodičů do obvodu termoelektrického článku, ale jen za předpokladu, že konce každého dalšího vodiče mají na spojích stejnou teplotu. Tato vlastnost je velmi důležitá, protože uvedené zapojení vznikne při připojení měřicího zařízení do obvodu termočlánku.

Pokud není možné udržovat teplotu srovnávacích spojů termoelektrického článku na konstantní hodnotě, je možné uspořádání s dalším termoelektrickým článkem, jehož vztažné spoje již budou v prostředí s konstantní teplotou. Toto uspořádání je využíváno u prodlužovacího vedení z termoelektrických materiálů.

[1]

2.3.8 Typy termočlánků

Termočlánky se rozlišují podle použitých materiálů, ze kterých jsou vyrobeny a jejich značení se provádí písmenem. Druh použitého materiálu a průměr drátů ovlivňuje vlastnosti termočlánku a rozsah teplot, pro které je možno jej použít. Termočlánky jsou označeny dle norem ČSN IEC 584-1 (termočlánky typu B, R, S, N, K, E, J, T) nebo DIN 43710 (termočlánky typu L, U).

Typ	Rozsah teplot	Složení	
		+ pól	-pól
B	0 až 1820°C	Platina – 30% Rhodium (Pt30Rh)	Platina – 6% Rhodium (Pt6Rh)
E	-90 až +900°C	Nikl – Chrom (NiCr)	Měď – Nikl (CuNi)
J	-180 až +740°C	Železo (Fe)	Měď – Nikl (CuNi)
K	-260 až +1340°C	Nikl – Chrom (NiCr)	Nikl (Ni)
R	-40 až +1700°C	Platina 13% (Pt13)	Platina (Pt)
S	-40 až +1700°C	Rhodium 10% (Rh10)	Platina (Pt)
T	-260 až +390°C	Měď (Cu)	Měď - Nikl (CuNi)
N	-200 až +1200°C	Nikl – Chrom - Křemík (NiCrSi)	Nikl - Křemík (NiSi)
L	-200 až +900°C	Železo (Fe), Fe-ko	Měď - Nikl (CuNi)
U	-200 až +600°C	Měď (Cu)	Měď - Nikl (CuNi)

2.4 Simulace termočlánků

Různé simulátory termočlánků jsou vlastně zdroje malého přesného napětí, které jsou schopny přesně simulovat termoelektrické napětí, vznikající na různých typech termočlánků při zadané teplotě. Je zde potřeba, aby tento simulační zdroj měl velkou přesnost a stálost, protože výstupní napětí termočlánků se pohybují v rozmezí cca 0-40mV. Toto výstupní napětí závisí na typu termočlánku a teplotě. Profesionální simulátory dokážou simulovat i více druhů termočlánků.

2.4.1 Porovnání profesionálních simulátorů

CL540 a CL540Z

Simulátor termočlánků typu J, K, T, E, R, S, B, N od firmy Omega. Obsahují paměť, možnost komunikace s ostatními systémy, zobrazování na pěti místném displeji. Dodává se s kompenzačním vedením délky 45 cm a s kompenzací studeného konce.

- Přesnost $\pm (0,015\% \text{ nastavené hodnoty v mV} + 0,009\text{mV}) \pm 05^\circ\text{C}$
- Rozlišení: $0,1^\circ\text{C}$ pro model CL540Z, 1°C pro model CL540
- Napájení: baterie 9V
- Cena: 13980 Kč

[5]



Obr. 2.10 Profesionální simulátory CL540 a CL540Z od firmy Omega [5]

CL3515R

Kalibrátor/teploměr s možností simulace 11 typů termočlánků (K, J, T, E, R, S, N, L, U, B) od firmy Omega, USB nebo RS232 rozhraní se softwarem s podporou Windows, zobrazování na čtyřmístném displeji.

- Rozsah výstupních napětí: -25 to 75 mV
- Rozlišení: $10\mu\text{V}$
- Přesnost: $\pm 0.025\% + 1 \text{ digit}$, $\pm (0.3^\circ\text{C} + 10 \mu\text{V})$
- Napájení: baterie 9V
- Cena 8260 Kč

[8]



Obr. 2.11 Profesionální simulátor CL3515R od firmy Omega [8]

CL300A

Multifunkční kalibrátor termočlánků typu J, K, T, E, R, S, B, L, U, C od firmy Omega, možnost měření teploty.

- Rozsah: -10 to 75 mV/simulátor termočlánků/měření
- Rozlišení: 1 μ V
- Přesnost: $\pm 0.007\%$ rdg, $\pm 10 \mu$ V, $\pm 0.1^\circ\text{C}$ nebo $^\circ\text{F}$ při simulaci, $\pm 0.01^\circ\text{C}$ nebo $^\circ\text{F}$ při měření
- Napájení: baterie 9V
- Cena: 20720 Kč

[9]



Obr. 2.12 Profesionální simulátor CL300A od firmy Omega [9]

Escort21

Kalibrátor/simulátor 13 typů termočlánků (J, K, E, T, R, S, B, N, G, C, D, U, L) od firmy MICRONIX,

- Cena: 7400 Kč

[7]



Obr. 2.13 Profesionální simulátor ESCORT21R od firmy Micronix [7]

TE5025

Programovatelný multifunkční kalibrátor od firmy TH&L Systems, simulace termočlánků typu (J,K,R,T,S,B,E a N), podpora sběrnic RS232, GPIB, USB.

Přesnost: $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Cena: neuvedeno

Funkce:

- Měření napětí 0 – 1050 V stejnosměrné i střídavé
- Měření proudu 0 – 22 A stejnosměrný i střídavý
- Měření odporu 0 – 1 G Ω
- Simulace termočlánků
- Digitální frekvence
- Kalibrace osciloskopů
- Simulace Pt100

[10]



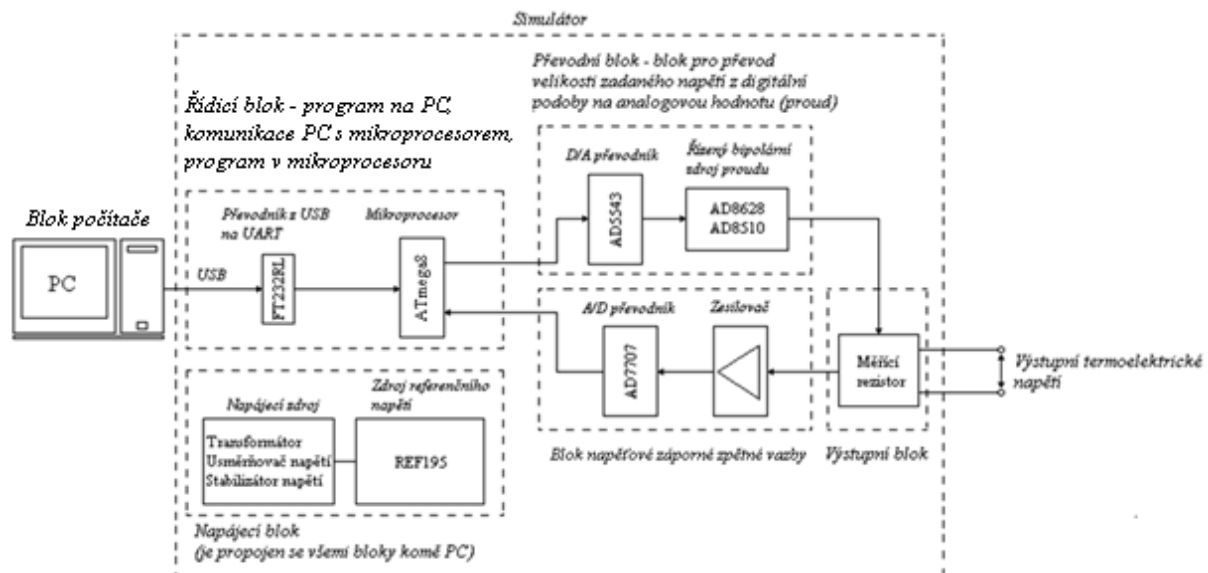
Obr. 2.14 Profesionální simulátor TE5025 od firmy TH&L [10]

2.4.2 Využití simulátorů

Z potřeb průmyslu vyplývá hned několik možností jak simulátory termočlánků využít. Simulátory termočlánků se mohou využívat jako zdroje referenčního napětí. Například se používají při kalibraci, cejchování a pro kontrolu různých měřících přístrojů určených pro měření termoelektrického napětí z termočlánků. Dále je možné je využít při vývoji a realizaci nových zařízení, nebo při nastavování různých termočlánekových zesilovačů. Takovéto simulátory ovšem musí být pravidelně testovány a kalibrovány, protože se časem mohou změnit jejich parametry. Při používání nekalibrovaných přístrojů by potom docházelo k chybám a podávaly by nesprávné hodnoty. Kalibrace mohou provádět pouze speciální akreditované laboratoře.

3. Návrh elektronického zapojení

3.1 Blokové schéma, popis



Obr. 3.1 Blokové schéma

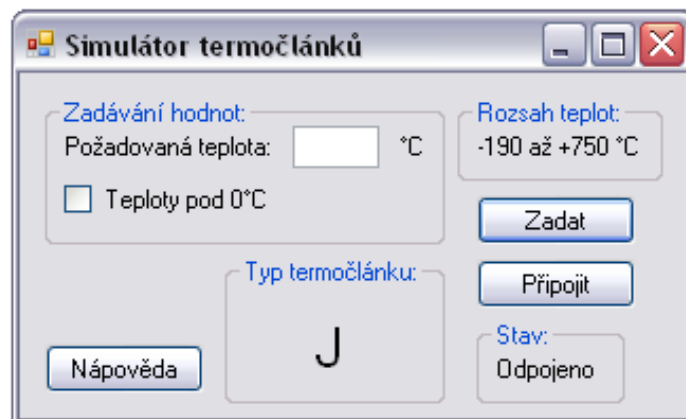
Simulátor se skládá z šesti základních bloků:

- Blok s počítačem
- Napájecí blok
- Řídicí blok
- Převodní blok
- Výstupní blok
- Blok napěťové zpětné vazby

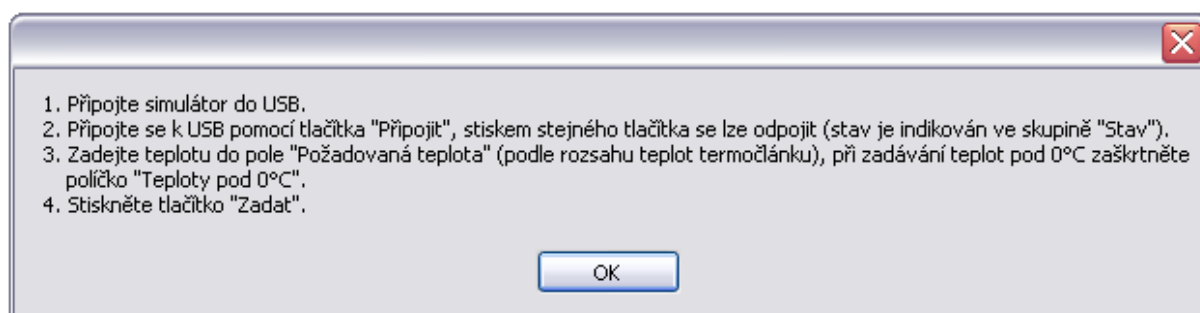
3.2 Blok s počítačem

Počítač obsahuje program, který zajišťuje vizualizaci a řízení simulátoru přes sériovou sběrnici USB. Program je napsán v prostředí Microsoft Visual Studio 2008 v jazyce C#. Program obsahuje tyto základní části:

- Vizualizace řízení s nastavovacími prvky – obsahuje tlačítko pro připojení a odpojení k USB (je prezentováno jako virtuální sériový port), zobrazování stavu (připojeno, odpojeno), zobrazování rozsahu teplot, pro které je daný termočlánek typu J určen. Dále obsahuje políčko pro zadání velikosti teploty, zaškrťovací tlačítko, které se v případě zadávání teplot pod 0°C zaškrtně, tlačítko pro odeslání dat do mikroprocesoru „Zadat“ a tlačítko pro zobrazení nápovědy „Nápověda“.



Obr. 3.2 Vizualizace řízení simulátoru



Obr. 3.3 Zobrazení nápovědy

- Kalibrační tabulku termočlánku typu J – kalibrační tabulka je ve formátu sešitu Excel (přípona .xls) a dle zvolené teploty bude vyčtena příslušná hodnota termoelektrického napětí.
- Komunikace přes USB – obsahuje odesílání vybraného termoelektrického napětí přes sběrnici USB do mikroprocesoru.

Ovládání programu

1. Připojit simulátor
2. Připojit se k USB pomocí tlačítka „Připojit“. Při opětovném stisku tlačítka se aplikace odpojí od USB. Stav (jestli je aplikace připojena nebo odpojena) je indikován v kolonce „Stav“.
3. Zadávání teploty do políčka „Požadovaná teplota“ ve stupních celsia. V případě zadávání teplot pod 0°C je nutné zaškrtnout políčko „Teploty pod 0°C“. Rozsah teplot, pro které je termočlánek určen je zobrazen v políčku „Rozsah teplot“.
4. Stiskem tlačítka „Zadat“ se otevře kalibrační tabulka, vybere se požadované napětí z upravené kalibrační tabulky podle zadané teploty a následně se pošle přes USB do mikroprocesoru. Vybírání napětí z tabulky se provádí následujícím způsobem:
 - zadaná teplota se celočíselně vydělí číslem 10 a přičte se číslo 1. Tím se získá řádek, na kterém je umístěna požadovaná velikost napětí.
 - sloupec se získá jako zbytek po celočíselném dělení, ke kterému se přičte číslo jedna a proměnná „plusminus“. V proměnné „plusminus“ je v případě zadávání kladných teplot uloženo číslo 0. V případě zadávání záporných teplot se při zaškrtnutí políčka „Teploty pod 0°C“ uloží číslo 10. tím se přejde v tabulce o 10 sloupců vlevo, kde jsou uložena napětí pro záporné teploty.
5. V případě, že by zadaná teplota ležela mimo rozsah teplot termočlánku, vypíše se chybové hlášení.

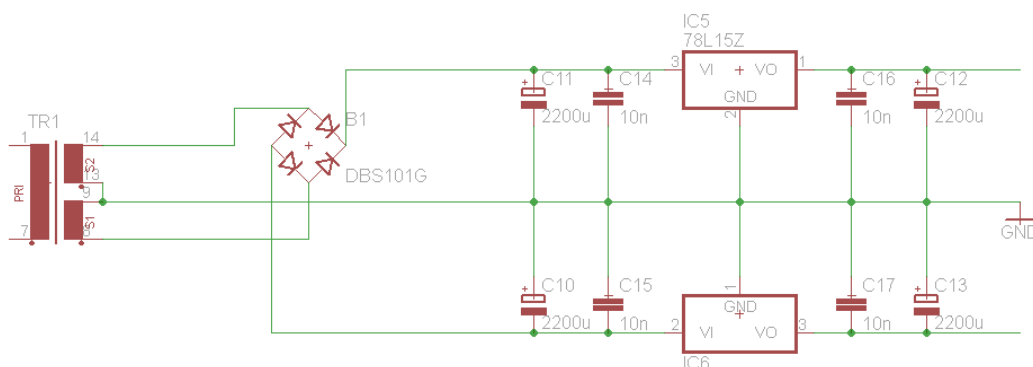
Nastavení sériového portu:

- Přenosová rychlost (BaudRate): 9600 b/s
- 8 datových bitů, no parity, 1 stop bit

3.3 Napájecí blok

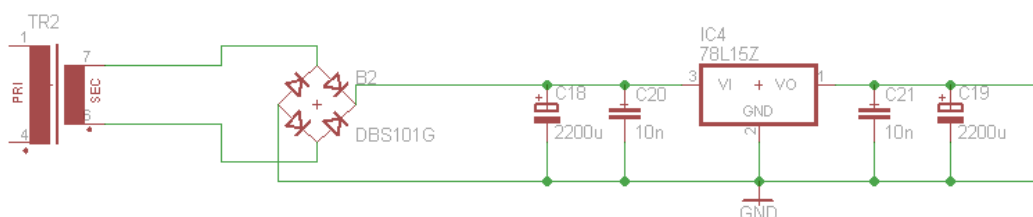
Napájecí blok je tvořen dvěma síťovými zdroji ($\pm 15V$ a $+5V$), kterými jsou napájeny všechny integrované obvody simulátoru. Dále obsahuje zdroj přesného referenčního napětí $+5V$ pro D/A převodník (REF195).

Síťový zdroj $\pm 15V$ je tvořen síťovým transformátorem se dvěma sekundárními vinutími (každé po $15V$). Toto napětí je dále usměrněno usměrňovacím můstkem, vyfiltrováno kondenzátory a stabilizováno (kladná větev stabilizátorem $+15V$ 78L15Z a záporná větev stabilizátorem $-15V$ 79L15Z) viz **Obr. 3.4**.



Obr. 3.4 Schéma zapojení síťového zdroje $\pm 15V$

Síťový zdroj $+5V$ je tvořen síťovým transformátorem s jedním sekundárním vinutím s napětím $5V$. Toto napětí je usměrněno usměrňovacím můstkem, vyfiltrováno kondenzátory a stabilizováno stabilizátorem $+5V$ 78L5 viz **Obr. 3.5**.



Obr. 3.5 Schéma zapojení síťového zdroje $+5V$

3.4 Řídicí blok

Řídicí blok zajišťuje komunikaci mezi počítačem a mikroprocesorem. Tato komunikace probíhá přes sériovou sběrnici USB. Propojení mikroprocesoru a počítače pomocí USB je obtížnější než propojení například s RS232. To proto, že téměř všechny mikroprocesory mají implementováno komunikační rozhraní USART (UART), které podporuje přenos dat po RS232 a to lze po změně napěťových úrovní přímo propojit pomocí RS232 s počítačem. USB však pracuje na úplně jiném principu a není možné jej „jen tak“ propojit.

Možnosti propojení:

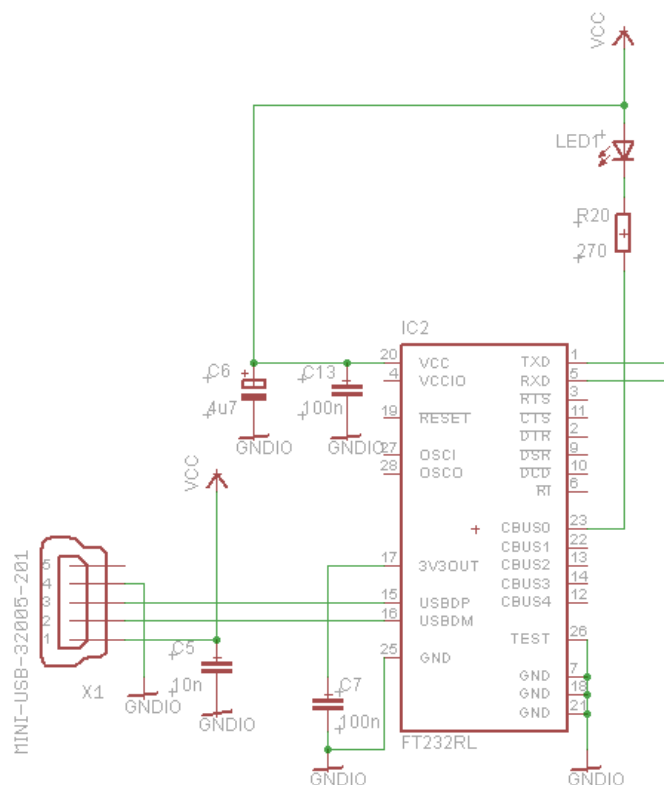
- Použití speciálního mikroprocesoru, který má již od výroby vestavěno rozhraní pro USB (například 8 bitový mikroprocesor EM78M611 od firmy ELAN). Tyto mikroprocesory ale nejsou příliš rozšířeny a je jich málo.
- Vytvoření programu v mikroprocesoru, který by byl schopen zajistit komunikaci přes USB přímo. Toto řešení je ovšem velmi náročné na schopnosti programátora.
- Použití převodníku USB/UART (FT232RL od firmy FTDI Chip nebo CP2102 od firmy Silicon Laboratories). Takové převodníky se vyrábějí ve formě integrovaných obvodů a jejich implementace do zapojení je relativně jednoduchá. USB se pak pro mikroprocesor jeví jako sériová linka RS232 a pro počítač jako virtuální sériový port (COM), který má však vyšší rychlost a ostatní výhody USB. Dále podporují i řízení přenosu (CTS, RTS).

Pro simulátor byl vybrán převodník FT232RL. Na obrázku **Obr. 3.6** je schéma zapojení převodníku. Kvůli větší vzdálenosti simulátoru od počítače jsou na datové vodiče připojeny proti zemi kondenzátory C5 a C6, které slouží k odstranění šumu. Napájecí napětí je +5V z USB, které je připojeno přes blokovací kondenzátor na zem. Kvůli možnosti přenášení rušivých signálů je potřeba USB (a také obvod FT232RL), galvanicky oddělit od zbytku zapojení. Galvanické oddělení je provedeno optickým oddělením pomocí optočlenu SU1357. Kvůli možnosti obousměrné komunikaci je potřeba zapojit dva optočlenu (jeden pro zápis a druhý pro čtení). Jejich zapojení ukazuje obrázek **Obr. 3.7**. Optočlen pro zápis do mikroprocesoru je napájen ze síťového zdroje, optočlen pro čtení z mikroprocesoru je napájen z USB. Jsou použity i dvě země (jedna z USB a druhá pro analogovou část). Jelikož optočlenu invertují signál, je ke každému připojen tranzistor, který signál opět invertuje. Takže na výstupu je signál neinvertovaný.

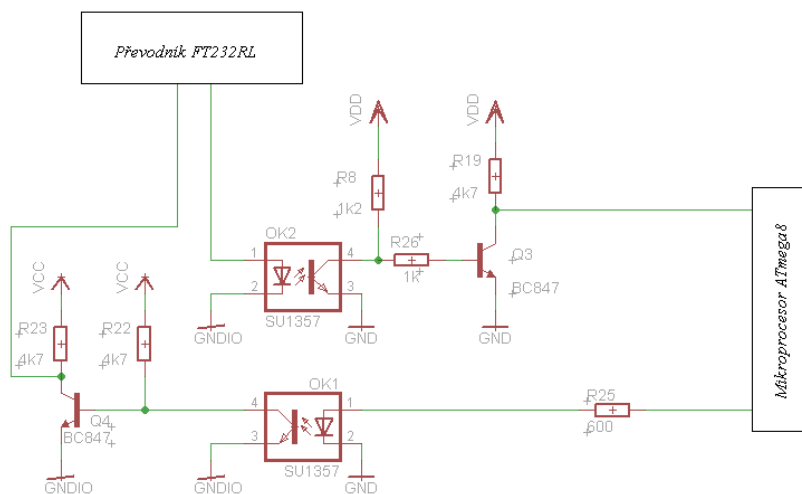
Parametry převodníku FT232RL:

- Napájecí napětí: od +1,8V do +5,25V
- Interní zdroj hodinových impulsů
- Možnost synchronního a asynchronního přenosu dat
- Rychlost přenosu od 300 baud do 3 Mbaud

[16]



Obr. 3.6 Zapojení převodníku FT232RL



Obr. 3.7 Zapojení optického oddělení USB od mikroprocesoru

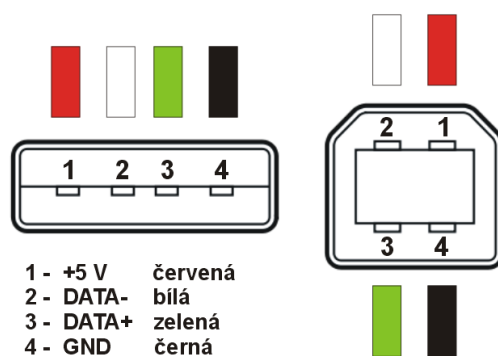
Komunikace přes sériovou sběrnici USB

USB je univerzální sériová sběrnice (z anglického Universal Serial Bus). Pomocí USB lze jednoduše připojit různé periferie k PC (myš, klávesnice, tiskárny, herní zařízení, fotoaparáty, MP3 přehrávače, díky možnosti napájení přímo přes sběrnici umožňuje připojit například USB lampičku a spoustu dalších podobných periférií), a to i za chodu počítače (Plug & Play). Dále umožňuje napájení připojených periférií maximálním napětím +5V a maximálním odebíraným proudem 500mA. USB v nových počítačích a noteboocích nahrazuje většinu používaných připojení, jako jsou například

sériový a paralelní port, Game port, PS/2 a další. Z důvodu, že se například sériová sběrnice RS232 se v průmyslu stále používá, se vyrábějí různé redukce (převodníky). Tyto redukce umožňují převod z USB na jinou požadovanou sběrnici. [6]

Propojení:

USB využívá různé druhy konektorů, které se liší velikostí a tvarem (micro USB, mini USB, USB). Pro propojení je použit kabel tvořený čtyřicí vodičů stíněných hliníkovou fólií. Ze čtyř vodičů se dva používají pro komunikaci (DATA+ a DATA-), další slouží pro napájení +5V a poslední je zem (GND). Maximální délka kabelu je cca 5m. V případě potřeby více USB portů stačí připojit tzv. USB Hub, který může jeden USB port rozšířit o další 3 USB porty. Celkově je možno připojit až 127 zařízení. [6]



Obr. 3.8 Zapojení mini USB a USB (zástrčka) [6]

Komunikace:

USB pracuje se zařízeními jako Master-Slave. Komunikace probíhá pomocí rámců (frame) trvajících jednu milisekundu. Odesílaná zpráva je rozdělena buď na krátké pakety obsahující 8B, nebo na dlouhé pakety obsahující 256B. Ke komunikaci se využívá metoda NRZI (z anglického Non Return To Zero), u které je změna logické úrovně vyvolána log 0. Log 1 ponechává stávající logickou úroveň. V případě, že dojde k přenosu šesti po sobě jdoucích log 1, tak za ně vysílač automaticky přidá log 0. Po přijetí dat přijímač tyto nuly automaticky odstraní. Synchronizace toku dat se provádí tzv. zaváděcím bajtem. [6]

Mikroprocesor:

Mikroprocesor byl zvolen ATmega8L-8AU. V něm je realizován příjem dat z PC (obsluha RS232) a následné posílání příslušné hodnoty do D/A převodníku. Posílaná data jsou ve formě dvou bytů (16 bitů). Dále je v mikroprocesoru realizována softwarová část napěťové zpětné vazby. Ta se skládá z A/D převodníku, ze kterého je přijato číslo. Toto číslo představuje velikost výstupního termoelektrického napětí, které je 100 krát zesíleno. Tato hodnota je porovnávána s požadovanou hodnotou. Mikroprocesor pak zprostředkuje zásah tak, aby byla naměřená hodnota shodná s požadovanou hodnotou.

K mikroprocesoru je připojen konektor, sloužící k jeho naprogramování. Tento konektor využívá sériové sběrnice zvané SPI. Pomocí této sběrnice jsou připojeny i A/D a D/A převodníky a to z toho

důvodu, že se tím zmenší počet potřebných portů pro jejich připojení a zjednoduší se komunikace díky podpoře tohoto rozhraní mikroprocesorem. Pro tuto komunikaci se využívá vývodů:

- MISO na portu PB4 – vstup dat do mikroprocesoru
- MOSI na portu PB3 – výstup dat z mikroprocesoru
- SCK na portu PB5 – generátor hodinový impulsů
- Pin PC0 – jako CS (výběr periferie) D/A převodníku AD5543
- Pin PC1 – jako CS (výběr periferie) A/D převodníku AD7707

Pro naprogramování bylo využito profesionálního programátoru PRESTO od firmy ASIX. Programování se děje pomocí SPI (Serial Peripheral Interface) a programu ASIX UP. Programátor je s počítačem spojen pomocí USB (v počítači je třeba nejdříve nainstalovat ovladače dostupné na webu firmy ASIX). S mikroprocesorem je spojen pomocí šesti vodičů (MISO, MOSI, SCK, RESET, V_{DD} , GND).

Parametry mikroprocesoru ATmega8L-8AU:

- Napájecí napětí +5V
- 8bitový mikroprocesor
- 8kByte ISP FLASH paměť, 1kByte RAM, 512Byte EEPROM
- Dva 8b časovače/čítače, jeden 16b časovač/čítač
- 3 PWM kanály
- Šest 10b A/D převodníků, dva 8b A/D převodníky
- USART, SPI, 3-wire
- Interní oscilátor

[17]

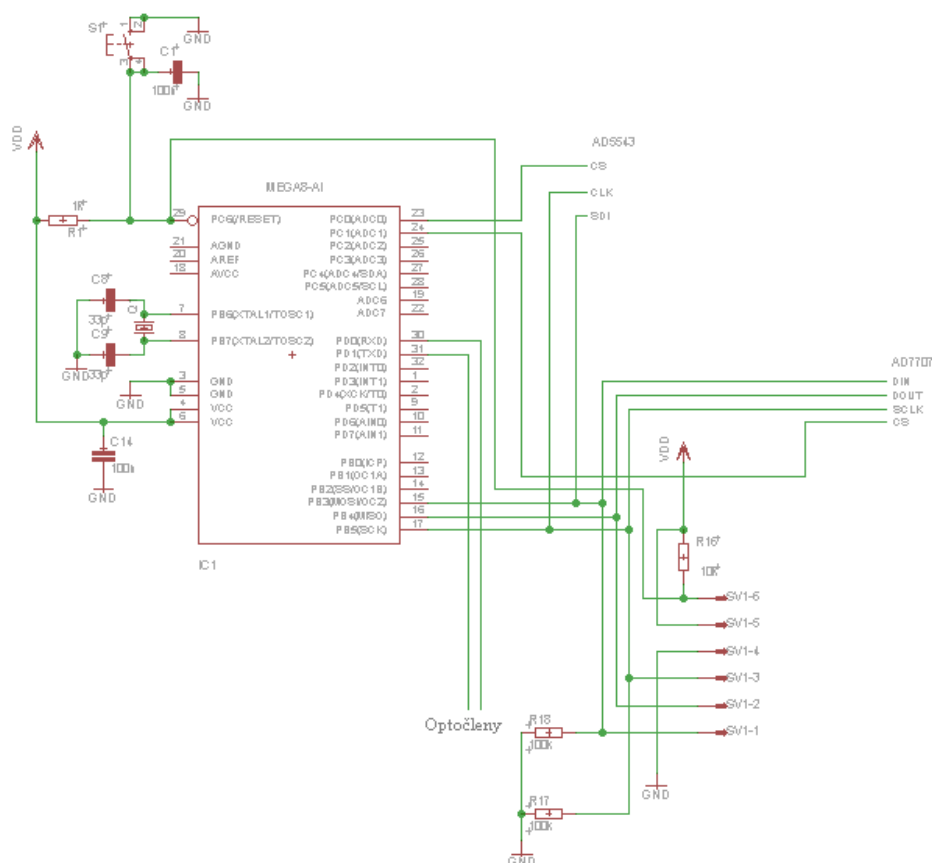
SPI rozhraní:

SPI je jednoduché sériové rozhraní pracující v režimu Master-Slave. Mikroprocesor (master) je propojen s periferním obvodem (slave) dvěma datovými vodiči (MISO – vstup dat do mikroprocesoru a MOSI – výstup dat z mikroprocesoru), jedním vodičem přenášejícím hodinový signál (SCK, SCLK). Dále se využívá ještě jednoho vodiče, který slouží k výběru dané periferie (CS). Takováto sériová rozhraní se zavádějí hlavně kvůli zmenšení počtu vývodů integrovaných obvodů (3 až 4 vodiče pro komunikaci) a kvůli zjednodušení komunikace díky podpoře tohoto rozhraní mikroprocesorem.

Komunikace:

- V mikroprocesoru se vybere periferie přiřazením log. 0 na jeho CS vývod.
- Při čtení začne mikroprocesor generovat hodinový signál (SCLK) a pomocí datového vodiče MISO začne přijímat data z periferie
- Při zápisu začne mikroprocesor generovat hodinový signál (SCLK) a pomocí datového vodiče MOSI začne vysílat data do periferie
- Délka vysílaných dat je buď 8b nebo 16b.

[19]



3.5 Převodní blok

Převodní blok slouží k převodu velikosti zadaného výstupního napětí z digitální podoby na analogovou (konkrétně na proud). K tomu je použit 16 bitový D/A převodník AD5543 se sériovým přenosem dat a proudovým výstupem. Tento převodník řídí bipolární zdroj proudu, který je tvořen dvěma operačními zesilovači (AD8628 a AD8510) viz **Obr. 3.14**. Výstupní proud se určí podle vzorce

$$I_L = \frac{R_2 + R_3}{R_1} \cdot V_{REF} \cdot D \quad (3.1)$$

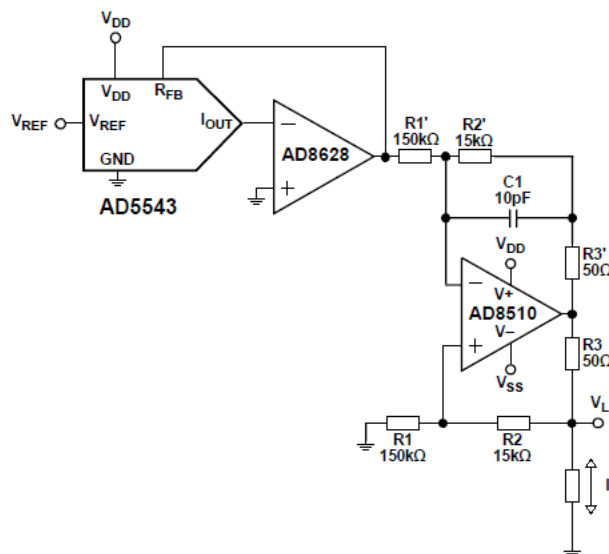
kde V_{REF} je přesné referenční napětí, které je získáno pomocí referenčního zdroje napětí tvořeného integrovaným obvodem REF195 (referenční napětí +5V), který je napájen +5V ze zdroje. D je 16b číslo v digitální podobě, které je posláno na D/A převodník.

Zvolené hodnoty rezistorů:

$R_1=1\text{k}\Omega$, $R_2=15\text{k}\Omega$, $R_3=150\text{k}\Omega$, $R_{měřicí}=1\text{k}\Omega$

Pro tyto hodnoty rezistorů by měl teoreticky být maximální výstupní proud takový, že na měřicím rezistoru $R_{měřicí}$ vyvolá maximální úbytek napětí 53mV.

[11]



Obr. 3.10 Zapojení bipolárního řízeného zdroje proudu [11]

Parametry D/A převodníku AD5543:

- Napájecí napětí +5V
- Napěťová reference +5V
- Rozlišení 16b
- Podpora SPI
- Vstupní data: 0x0000 až 0xFFFF (Délka datového slova 16b)

[11]

Parametry operačního zesilovače AD8628:

- Napájecí napětí +5V

- Velké zesílení a CMR

[14]

Parametry operačního zesilovače AD8510:

- Napájecí napětí $\pm 15\text{V}$

[13]

3.6 Výstupní blok

Výstupní blok je tvořen konektorem, ke kterému se připojí měřicí rezistor. Přes něj protéká proud z řízeného zdroje proudu a vyvolává na něm úbytek napětí. Tento úbytek napětí je požadované termoelektrické napětí. Velikost úbytku napětí závisí na velikosti odporu rezistoru a jím protékajícím proudem dle Ohmova zákona:

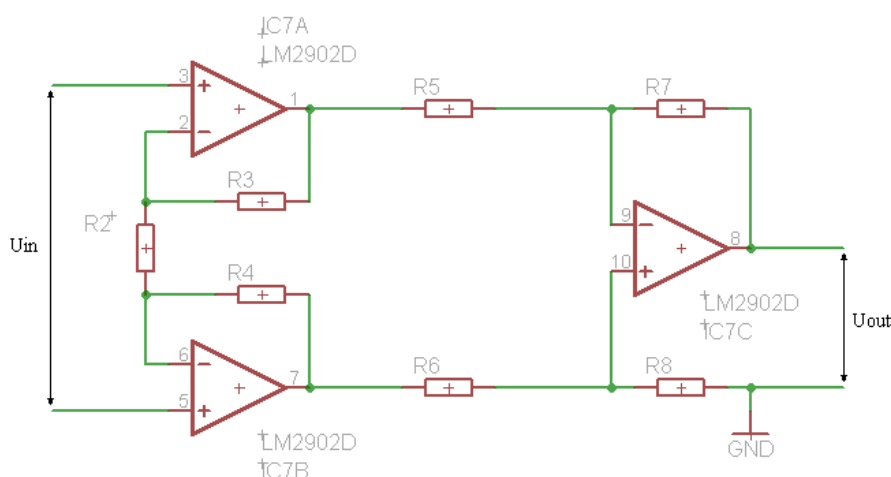
$$R = \frac{U}{I} \quad (3.2)$$

3.7 Blok napěťové zpětné vazby

Napětí na měřicím rezistoru je snímáno měřicím zesilovačem. To proto, že napětí na rezistoru se pohybuje maximálně do $+40\text{mV}$ a A/D převodník by nebyl schopen tak malé napětí převést. Zesilovač je zapojen podle obrázku **Obr. 3.11** a je použit operační zesilovač LM2902, který je napájen ze zdroje $\pm 15\text{V}$. Zesílení se určí podle vzorce:

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \left(1 + \frac{2R_3}{R_2}\right) \cdot \left(\frac{R_6}{R_5}\right). \quad R_5 = R_{5B}, \quad R_6 = R_{6B} \quad (3.3)$$

Zesílení měřicího zesilovače bylo nastaveno na hodnotu 100. To znamená, že při vstupním napětí $+10\text{mV}$, které bude přiváděno na A/D převodník AD7707, bude výstupní napětí $+1\text{V}$. To samé platí i pro záporné hodnoty napětí.



Obr. 3.11 Schéma zapojení měřicího zesilovače

Dále je zesílené napětí přivedeno na 16 bitový A/D převodník AD7707 s bipolárním vstupním napětím ($\pm 5\text{V}$) a sériovým výstupem dat. Ten analogovou hodnotu napětí převede na číslo a pošle jej do mikroprocesoru. Převodník je napájen $+5\text{V}$ ze síťového zdroje. Jako zdroj referenčního napětí $+5\text{V}$ je použit integrovaný obvod REF195.

Parametry operačního zesilovače LM2902:

- Napájecí napětí $\pm 15V$
- Univerzální operační zesilovač [18]

Parametry A/D převodníku AD7707:

- Napájecí napětí $+5V$
- Napěťová reference $+5V$
- Vstupní napětí $\pm 5V$
- Rozlišení 16b
- Externí oscilátor (krystal 4MHz)
- Podpora SPI
- Délka datového slova 16b [12]

4. Deska plošného spoje

Deska plošného spoje (DPS) o rozměrech 103 x 72mm, viz **Obr. II** a **Obr. III** v příloze, byla navržena spolu se schématem zapojení v programu Eagle. Pro tvorbu nebylo využito funkce autorouter, ale byla navržena ručně. Deska je oboustranná a stejně jako schéma zapojení je rozdělena do tří segmentů. Tyto segmenty mají každý vlastní zemění z důvodu eliminace rušivých napětí a proudů:

- Komunikační část USB – tato část má i vlastní napájení s USB a zem označenou jako GNDIO. Tato část je galvanicky oddělena optočleny, čemuž odpovídá i fyzické oddělení zemí s dostatečnou izolační mezerou.
- Digitální část mikroprocesoru, A/D a D/A převodníku – tato část je napájena z externího zdroje (společný i pro analogovou část), zem má označenou jako GND. Digitální část je rovněž fyzicky oddělena od ostatních částí. Přechod mezi analogovou částí a digitální částí tvoří A/D a D/A převodníky.
- Analogová část – tato část je napájena s externího zdroje a zem má označenou jako GNDA. Zem digitální části je spojena se zemí analogové části, ale pouze v jednom definovaném bodě (propojka místo rezistoru R24). Analogová část je také fyzicky oddělena od ostatních částí.

DPS byla navržena v rámci mých schopností a dovedností s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu (EMC). To znamená, že byla snaha o co nejlepší rozmístění součástek a jejich napájení (blokování kondenzátory), rozdělení zemí, galvanické oddělení od PC, nejsou použity zbytečně rychlé součástky, vylití země apod.

5. Závěr

V teoretické části této práce byly stručně popsány základní teoretické znalosti z měření teploty (co je teplo, teplota, druhy teploměrů a jejich základní principy fungování). Dále byl detailněji popsán termočlánek. Byla popsána jak jeho funkce (Seebeckův jev, složení termočlánku, typy termočlánků, životnost termočlánků, termoelektrická pravidla) tak i chyby a nejistoty měření a kompenzace studeného konce. Následně byl vysvětlen princip a důvody konstruování simulátorů termočlánků s ukázkami a porovnání profesionálních simulátorů od firem Omega, TH&L Systems a Micronix.

Po teoretické části následoval návrh zapojení simulátoru řízeného počítačem s ohledem na požadované funkce. Zadáním bylo vytvořit simulátor, který bude řízený počítačem. U takového zapojení není kladen požadavek na rychlost, ale na přesnost. Pro zjednodušení se prozatím nerealizovala kompenzace studeného konce. Kompenzaci lze v budoucnu dodělat.

Po návrhu schématu zapojení následoval návrh desky plošného spoje a její následná výroba v laboratořích VŠB. Součástky byly voleny s ohledem na cenu a přesnost.

Na počítači byla navržena aplikace v Microsoft Visual Studiu 2008, která zprostředkovává graficko-uživatelské rozhraní celého simulátoru. Funkčnost komunikace mezi počítačem a deskou simulátoru byla ověřena jeho připojením do USB počítače. Následně bylo potřeba nainstalovat ovladače pro převodník FT232RL. Po jejich instalaci počítač rozeznal tuto součástku a bylo možné dále po zadání správného označení virtuálního sériového portu COM ve Visual Studiu se připojit k simulátoru. Funkčnost odesílání dat byla ověřena kontrolní LED diodou na desce simulátoru, která při přijímání dat bliká.

Blok pro převod USB na RS232 byl po menších úpravách (nastavení pracovního bodu tranzistorů pro invertování signálu pomocí dvou rezistorů) plně funkční. Pro oživení ostatních bloků se upravily programy v počítači a v mikroprocesoru. V mikroprocesoru je program, který by měl přeposílat data přijatá z počítače pomocí SPI do D/A převodníku. Převodník dále řídí zdroj proudu, který vytváří úbytek napětí na měřicím rezistoru. Program v mikroprocesoru a zapojení mikroprocesoru se jeví, že jsou v pořádku, ale přijímání dat z počítače se nepodařilo zprovoznit. Zpětná vazba je prozatím funkční pouze k měřicímu zesilovači. Ten snímá napětí a 100 krát jej zesílí. Zbytek zpětné vazby (A/D převodník) je odpojen. V počítači je zkušební program, který posílá hodnotu, která se musí ručně zapsat do programu. Pro budoucí práci na přístroji je třeba dodělat zbytek zpětné vazby a vyladit program v mikroprocesoru a počítači.

Při ožívování se měřením posílaných dat pomocí digitálního osciloskopu zjistilo, že nastavená rychlost přenosu 57600 b/s je příliš velká (posílaná data byla příliš zkreslená a nevhodná pro další zpracování). Rychlost byla zmenšena na 9600 b/s jak na straně počítače, tak na straně mikroprocesoru. Poté byla data mnohem méně zkreslená a již vhodná pro další zpracování.

V průběhu realizace se objevila celá řada komplikací. Objevily se chyby na plošném spoji, které byly opraveny proškrábnutím cest, pomocí drátových propojek a výměnou součástek. Pro zjednodušení se pro napájení používal laboratorní zdroj místo síťového zdroje. Do budoucna je třeba navrhnout blok napájení, aby byl simulátor mobilní. Cena prototypu je 677 Kč. V ceně není započtena výroba a prostředky pro výrobu desky plošného spoje, jsou započteny pouze součástky.

Seznam použité literatury a internetových zdrojů

- [1] KREIDL, M. Měření teploty - senzory a měřicí obvody. BEN - technická literatura, Praha 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. 2002, 29. 3. 2010 [cit. 2010-05-01]. Teplo - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <www.wikipedia.cz>.
- [3] *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. 2002, 5. 3. 2010 [cit. 2010-05-01]. Teplota - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <www.wikipedia.cz>.
- [4] *Omega Engineering Česká republika* [online]. c1995 - 2005 [cit. 2010-05-01]. Termočláňkové sondy a sestavy: Holé a izolované termočláňky malých průměrů. Dostupné z WWW: <www.omegaeng.cz>.
- [5] *Omega Engineering Česká republika* [online]. c1995 - 2005 [cit. 2010-05-01]. CL540 a CL540Z Série: Simulátor termočláňků. Dostupné z WWW: <www.omegaeng.cz>.
- [6] ŘEHÁK, Jan. *HW.cz | Vše o elektronice a programování* [online]. 7.5 2002 [cit. 2010-05-01]. USB - Universal Serial Bus - Popis rozhraní | HW.cz. Dostupné z WWW: <www.hw.cz>.
- [7] *Úvodní stránka - Micronix* [online]. c2010 [cit. 2010-05-03]. ESCORT 21 - Kalibrátory - Měřicí technika - Micronix. Dostupné z WWW: <www.micronix.cz>.
- [8] *Omega Engineering Česká republika* [online]. c1995-2005 [cit. 2010-05-03]. CL3515R : Calibrator/thermometer. Dostupné z WWW: <www.omegaeng.cz>.
- [9] *Omega Engineering Česká republika* [online]. c1995-2005 [cit. 2010-05-03]. CL300A : Multifunction Thermocouple calibrator. Dostupné z WWW: <www.omegaeng.cz>.
- [10] *TH&L Systems* [online]. c2010 [cit. 2010-05-03]. TH&L Systems - měřicí a kalibrační technika :: Kalibrátor TE 5025. Dostupné z WWW: <www.thlsystems.com>.
- [11] *AD5543_5553*. [s.l.] : Analog Devices, c2002-2009. 16 s. Dostupné z WWW: <www.analog.com>.
- [12] *AD7707*. [s.l.] : Analog Devices, c2000-2010. 52 s. Dostupné z WWW: <www.analog.com>.
- [13] *AD8510_8512_8513*. [s.l.] : Analog Devices, c2002-2009. 20 s. Dostupné z WWW: <www.analog.com>.
- [14] *AD8628_8629_8630*. [s.l.] : Analog Devices, c2002-2008. 20 s. Dostupné z WWW: <www.analog.com>.
- [15] *REF19xSeries*. [s.l.] : Analog Devices, c1996-2008. 28 s. Dostupné z WWW: <www.analog.com>.
- [16] *Dsh.959-303.1*. [s.l.] : FTDI Chip, c2005. 29 s. Dostupné z WWW: <www.gme.cz>.
- [17] *Dsh.958-109.1*. [s.l.] : ATMEL, c2006. 303 s. Dostupné z WWW: <www.gme.cz>.
- [18] *Dsh.925-028.1*. [s.l.] : STMicroelectronics, c2007. 16 s. Dostupné z WWW: <www.gme.cz>.
- [19] *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. 2002, 3.12 2009 [cit. 2010-05-05]. Serial Peripheral Interface - Wikipedie, otevřená encyklopedie. Dostupné z WWW: <www.wikipedia.cz>.

Seznam příloh

I. Schéma zapojení.....	I
II. Deska plošného spoje.....	II
III. Seznam součástek.....	III
VI. Ukázka kalibrační tabulky termočlánku typu J.....	IV